

Список использованных источников

1. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Евстюгин С.Н. [и др.]. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей. – Екатеринбург: НПВП «ТОРЭКС», 2012. – 340 с.
2. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
3. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР / Под ред. П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1969. – 547 с.
4. Деменюк С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках. – СПб.: Страта, 2012. – 192 с.
5. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.: Техиздат, 1947. – 245 с.

УДК 662.7

И. Г. Донской

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ И БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ ТИПА SHELL-PRENFLO

Аннотация

Процесс газификации низкосортных топлив может быть неустойчивым из-за их низкой теплотворной способности, а также часто сопровождается образованием смолистых продуктов, поэтому добавление угля способствует повышению эффективности их переработки. С другой стороны, высокая реакционная способность биомассы может способствовать стабилизации режимов горения и газификации низкореакционных топлив, таких как угли высокой степени метаморфизма или коксовые остатки нефтепереработки. Совместная газификация топлив с существенно отличающимися свойствами не только смещает оптимальные режимы работы газогенератора (по удельному расходу окислителя и условиям шлакования), но и существенно влияет на процессы, связанные с подготовкой горючего газа к использованию в камере сгорания или каталитическом реакторе. В работе проведено численное исследование стационарных режимов газификации угольной пыли с добавлением биомассы в поточном газогенераторе с парокислородным дутьем. Получены расчетные зависимости эффективности процесса от управляющих параметров: доли биомассы в смеси с углем и удельного расхода кислорода.

Ключевые слова: газификация, уголь, биомасса, процесс Копперса-Тотцека, математическое моделирование

Abstract

The process of gasification of low-grade fuels can be unstable because of their low calorific value, and often accompanied by the formation of tarry products, so the addition of coal improves the efficiency of their processing. On the other hand, the high reactivity of biomass can contribute to the stabilization of combustion and gasification regimes of low-reactivity fuels, such as high grade coals or coke residues of oil refining. Co-gasification of fuels with significantly different properties displaces optimal operating modes of the gasifier (values of the specific consumption of the oxidizer and slagging temperatures) and

significantly affects the processes associated with the preparation of combustible gas for use in a combustion chamber or chemical reactor. In the work, mathematical modeling of steady-state regimes of coal-biomass gasification in a entrained-flow gasifier with steam-oxygen blowing was performed. The calculated dependencies of the cold gas efficiency on the control parameters (the fraction of biomass in the mixture with coal and the specific consumption of oxygen) are obtained.

Key words: *gasification, coal, biomass, entrained flow process, mathematical modelling.*

Использование биомассы в энергетике связано с двумя важными задачами: снижением зависимости энергосистем от дорогого качественного топлива, и повышением экологической эффективности теплоэнергетических установок (за счет переработки углеродсодержащих отходов и, в ряде случаев, снижения вредных выбросов). Помимо совместного сжигания, возможны также и другие способы переработки топлив, в том числе их совместная газификация. Процесс газификации низкосортных топлив может быть неустойчивым из-за их низкой теплотворной способности, часто сопровождается образованием смолистых продуктов, поэтому добавление угля способствует повышению эффективности их переработки. С другой стороны, высокая реакционная способность биомассы может способствовать стабилизации режимов горения и газификации низкореакционных топлив, таких как угли высокой степени метаморфизма или коксовые остатки нефтепереработки. В данной работе рассматривается процесс газификации измельченного топлива в несущем потоке, который позволяет получать газовое топливо для разных целей (парогазовый цикл, химическая технология [1]). Совместная газификация углеродсодержащих промышленных отходов и биомассы реализована на действующих угольных станциях [2-4]; теоретические исследования таких процессов проводились в работах [5, 6].

Совместная газификация топлив с существенно отличающимися свойствами не только смещает оптимальные режимы работы газогенератора (по удельному расходу окислителя и условиям шлакования), но и существенно влияет на процессы, связанные с подготовкой горючего газа к использованию в камере сгорания или каталитическом реакторе. Часто требуется дополнительная очистка (которая связана с потерями физической теплоты генераторного газа), либо регулировка состава горючей смеси (разбавление воздухом, азотом, водяным паром и т.д.). Минеральная часть топлив также оказывает влияние на процесс газификации, поскольку зола биомассы может смещать температурные границы шлакования [7] и усиливать коррозионные свойства шлака [8].

Использование низкосортных топлив позволяет в ряде случаев получить дополнительную выгоду в виде платы за утилизацию отходов, однако, для этого обычно требуется модернизация тепловой схемы (дополнительные секции подготовки сырья, охлаждения и очистки газа). Теплотворная способность низкосортных топлив практически всегда ниже, чем у энергетических углей, поэтому тепловой КПД энергоустановки при прочих равных условиях будет уменьшаться. Однако в условиях ограничений на вредные выбросы использование биомассы и отходов (даже при небольшом добавлении к основному топливу) может стать эффективным. Требуется выбирать условия таким образом, чтобы газификация биомассы была технически и экономически оправданной.

Как показывают теоретические и экспериментальные работы, при совместной газификации угля и биомассы часто существует оптимальное соотношение, при котором реализуется достаточно эффективная конверсия компонентов топливной смеси при незначительном изменении технической эффективности [9]. Настоящая работа посвящена исследованию термических режимов конверсии топливных частиц в реакционной зоне поточных газогенераторов.

В работе проведено математическое моделирование стационарных режимов газификации угольной пыли с добавлением биомассы в поточном газогенераторе с парокислородным дутьем. Характеристики топлив приведены в таблице.

Используется стационарная одномерная математическая модель процесса газификации с кинетико-термодинамическим блоком описания физико-химических превращений [10]. Основные ограничения и упрощения модели: не учитывается влияние рециркуляции газов; не учитывается влияние шлаковой пленки.

Таблица

Свойства угля и биомассы

Свойства	Уголь	Биомасса
W^r , %	2	8
A^d , %	15.38	0.5
C^{daf} , %	85.46	47.33
H^{daf} , %	4.86	5.97
O^{daf} , %	7.01	45.60
N^{daf} , %	2.00	1.80
S^{daf} , %	0.67	0.01
V^{daf} , %	29.42	85.00
d_{av} , μm	100	100

Переменными параметрами являются: коэффициент избытка окислителя; удельный расход пара; доля биомассы в смеси с углем. Реактор представлен в виде цилиндра, диаметр 3 м, длина реакционной зоны 6 м [11]. Рабочее давление составляет 30 атм, дутьем является смесь кислорода и водяного пара (удельный расход составляет 0.1 моль/моль углерода топлива), в качестве несущего газа в системе питания используется азот (итоговое отношение O_2/N_2 составляет 5,67). Расход топлива постоянный, равен 70 т/ч. Результаты расчетов представлены ниже в виде диаграмм. Из рис. видно, что при совместной газификации угля и биомассы проявляется неаддитивность, связанная с термическим взаимодействием топлив и продуктов их газификации.

Максимум химического КПД (77,8 %) достигается при доле биомассы около 60%, что говорит о целесообразности совместной газификации. При этом температура уходящего газа имеет значение порядка 1400–1500 К, что может быть недостаточно для жидкого шлакования, поэтому для соблюдения нужного термического режима придется использовать неоптимальные режимы (увеличивать избыток окислителя) [12]. Биомасса является более реакционноспособным топливом, однако из-за низкой теплотворной способности стационарные режимы газифика-

ции биомассы становятся возможными при больших коэффициентах избытка окислителя. При оптимальных условиях газификации чистого угля доля горючих компонентов в генераторном газе составляет 90%, а для чистой биомассы всего 60%. При газификации промежуточных составов доля горючих компонентов и теплотворная способность меняются достаточно равномерно. При максимальном химическом КПД теплотворная способность газа составляет около 9 МДж/нм³.

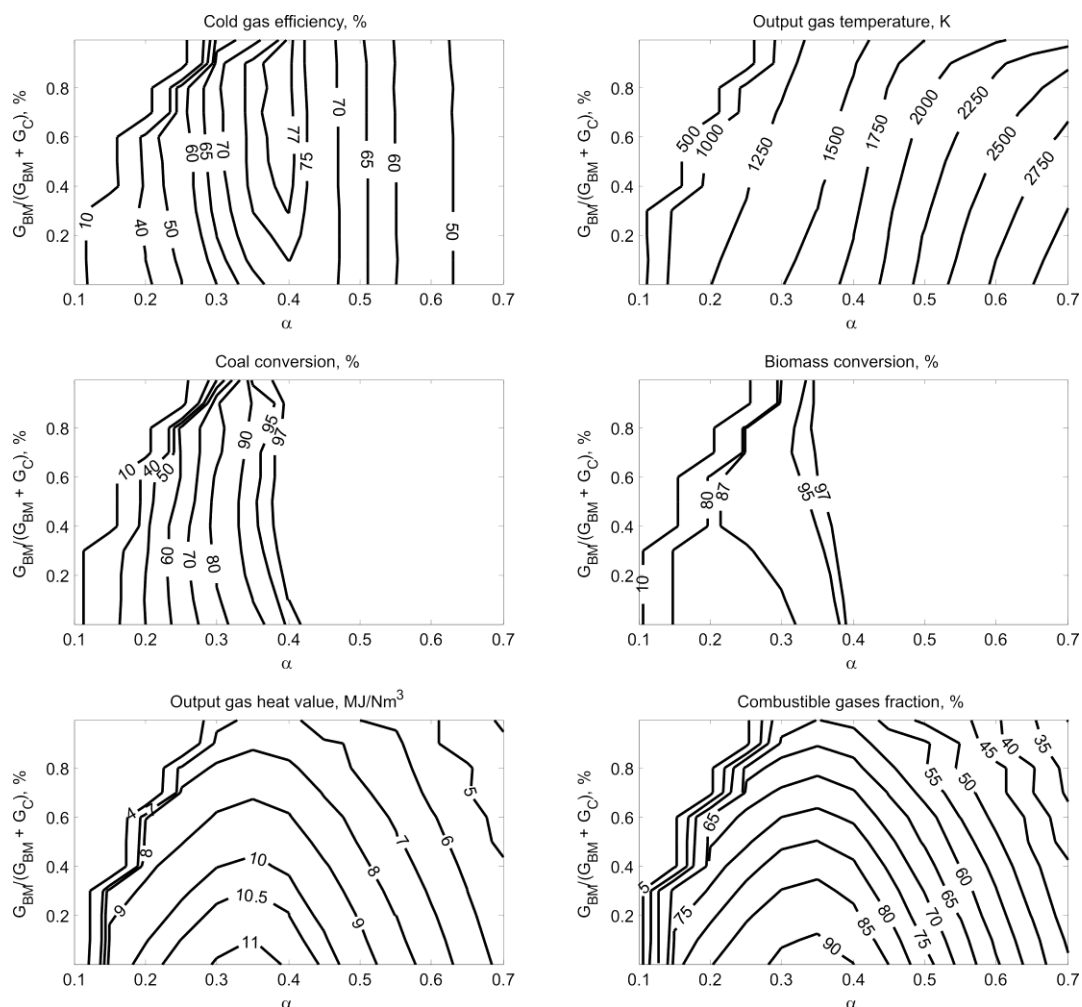


Рис. 1. Характеристики процесса совместной газификации угля и биомассы

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.1. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0

Список используемых источников

1. Развитие поточных газификационных технологий в Азиатско-Тихоокеанском регионе (обзор) / А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Цзэн Линянь, П.В. Осипов // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 40-50.
2. van Dongen A., Kamaar M. Co-gasification at the Buggenum IGCC power plant // DGMK-Fachbereichstagung «Energetische Nutzung von Biomassen» vom 24. bis 26. April 2006.

3. Co-gasification of coal-petcoke and biomass in the Puertollano IGCC power plant / D. Sofia, P.C. Llano, A. Giuliano, M.I. Hernandez, F.G. Pena, D. Barletta // Chemical Engineering Research and Design. 2014. V. 92. P. 1428-1440.
4. Experimental model validation and thermodynamic assessment on high percentage (up to 70%) biomass co-gasification at the 253 MWe integrated gasification combined cycle power plant in Buggenum, The Netherlands / A.T. Thattai, V. Oldenboek, L. Schoenmakers, T. Woudstra, P.V. Aravind // Applied Energy. 2016. V. 168. P. 381-393.
5. Co-gasification of coal and biomass wastes in an entrained flow gasifier: Modelling, simulation and integration opportunities / D.A. Ali, M.A. Gadalla, O.Y. Abdelaziz, C.P. Hulteberg, F.H. Ashour // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. V. 37. P. 126-137.
6. Investigation on co-gasification of coal and biomass in Shell gasifier by using a validated gasification model / H.J. Jeong, I.S. Hwang, S.S. Park, J. Hwang // Fuel. 2017. V. 196. P. 371-377.
7. Fang X., Jia L. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass // Bioresource Technology. 2012. V. 104. P. 769-774.
8. Mallick D., Mahanta P., Moholkar V.S. Co-gasification of coal and biomass blends: Chemistry and engineering // Fuel. 2017. V. 204. P. 106-128.
9. Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies / Ed. by T. Wang and G. Stiegel. Woodhead Publ., 2017. 929 p.
10. Донской И.Г. Математическое моделирование реакционной зоны газогенератора типа Shell-Prenflo с помощью моделей последовательных равновесий // Химия твердого топлива. 2016. № 3. С. 54-59.
11. Reduced order modeling of the Shell-Prenflo entrained flow gasifier / M. Gazani, G. Manzolini, E. Macchi, A.F. Ghoniem // Fuel. 2013. V. 104. P. 822-837.
12. Tremel A., Spliethoff H. Gasification kinetics during entrained flow gasification. - Part III: Modelling and optimisation of entrained flow gasifiers // Fuel. 2013. V. 107. P. 170-182.

УДК 662.76

И. С. Ефимовых, Т. Ф. Богатова, А. Ф. Рыжков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

КОНКУРЕНЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОНВЕРСИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Аннотация

В работе рассмотрены различные технологии конверсии твердого топлива – традиционного пылеугольного сжигания, сжигания в кипящем слое, газификации твердого топлива. Выполнен сравнительный анализ эффективности различных технологий. Оценены экологические показатели, показаны возможности снижения негативного воздействия на окружающую среду при применении технологии ПГУ с внутрицикловой газификацией. Показано, что одним из преимуществ ПГУ-ВЦГ является и высокая адаптивность основного элемента технологической